

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340091

研究課題名(和文)半導体量子ドットにおける核スピンエンタングルメントの生成と検出

研究課題名(英文)Generation and detection of nuclear spin entanglement in semiconductor quantum dots

研究代表者

大野 圭司(Ono, Keiji)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・専任研究員

研究者番号：00302802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円、(間接経費) 4,770,000円

研究成果の概要(和文)：1重項スピンプロケード領域とその周辺でのソースドレイン電流・電圧特性に核スピン偏極に起因すると思われるヒステリシスの詳細な測定および解析を行った。磁場5Tから8T程度で観測される1重項スピンプロケードと励起スペクトルで観測される1重項・3重項基底状態遷移はよく一致している。また1重項スピンプロケードのリーク電流は約10pA程度と通常の3重項スピンプロケードにくらべ大きい。これはエンタングル状態である1重項状態が核スピン揺らぎの影響により比較的容易に破壊されることで説明できる。これらの結果をまとめた論文がAppl.Phys.Lett誌にて出版された。

研究成果の概要(英文)：We observe a singlet spin blockade (SSB) in two-electron vertical double quantum dots where the single-electron transport is blocked for spin singlet electrons. In contrast to the conventional Pauli spin blockade with spin triplet electrons, this singlet spin blockade is observed under high magnetic field, where the doubly occupied states in one of the dots go beyond the singlet-triplet ground-state transition. The SSB region in Coulomb diamond measurements is in agreement with the two-electron excitation spectrum. A leakage current of 10 pA order is observed in SSB, consistent with the spin singlet lifetime due to random nuclear spin fluctuations. This results are published in Appl.Phys.Lett

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、物性

キーワード：半導体 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

量子ドット素子において、Ga もしくは As (共にドット構成材料)の核スピンを偏極、NMR 操作、検出することが可能となっている。核スピンの偏極は最大 40%程度、そのコヒーレンス時間は 1 ミリ秒に達し素子動作速度 (1 ナノ秒以下) 電子スピンのコヒーレンス時間 (1 マイクロ秒程度) と比べ十分に長いことが明らかになっている。またこれら核スピンの偏極は量子ドットのサイズ ~ 30nm 程度に局在し、そこに含まれる核の数はわずか 105 個程度であることから、高度な集積化が期待できる有望な量子情報の担い手に見える。しかしながら、核スピンの偏極を量子ビットとした研究は行われておらずその理由は核スピンの偏極だけでは完結した量子情報処理の枠組みを確立できなかったことにある。”DiVincenzo の基準“として知られる量子情報処理に必要な条件は、よく定義され、外界から十分に隔離された量子ビットの初期化、1 ビットユニタリ操作、2 ビットユニタリ操作、観測、が可能であることである。各量子ドットの核スピンの偏極を量子 1 ビットとした場合、すでに実現している核スピンの偏極は量子ビットの初期化に、NMR 操作と検出は 1 ビットユニタリ操作と観測にそれぞれ相当する。従って各ドットの核スピンの偏極状態が互いにエンタングルした状態の生成が実現できればこの枠組みでの 2 ビットユニタリ操作が可能になり、核スピンの偏極ベースの量子情報処理が完結することになる。

2. 研究の目的

半導体量子 2 重ドット結合系において最近申請者がみいだした 1 重項スピンのブロック効果を出発点に、核スピンの反転を伴う 1 重項から 3 重項への電子スピンの繰り返すことにより、一方のドットに局在している核スピンの多くが他方のドットに局在する核スピンの 1 重項的にエンタングルしている状態を作り出し、ドットに含まれる核スピンの数に対するエンタングルした核スピンの割合、エンタングルメント保持時間や各ドットの核スピンの偏極率などの未知の性質を明らかにする。さらに素子のソースドレイン電圧等を制御することにより一方のドットの核スピンの偏極状態を射影測定し、エンタングルメント状態が解除される様子を素子のソースドレイン電流で検出する。

3. 研究の方法

2 重量子ドット素子における 1 重項スピンのブロック効果を出発点とし、電子・核スピンの散乱により各ドットの核スピンの偏極がエンタングルした状態を作り出す。エンタングル状態における同方向核スピンの偏極の有無、エンタングルした核スピンのペアの数、エンタングルした核スピンのペアに対する NMR 交流磁場の影響、エンタングルメント保持時間等未知の特性を実験的に評価する。核スピンの偏極

が作り出す有効磁場を各ドットの電子スピンの準位に依存したドット・電極間電子移動により“観測”することでエンタングルメントを収縮、解除し、これをスピンのブロック効果漏れ電流の変化により測定する。1 重項スピンのブロック効果として、高磁場中の 1 重項・3 重項遷移の利用する方法と、4 電子量子ドットのフント効果を利用する方法を用いる。このうち前者はすでに 8T までの磁場中における予備実験で観測に成功している。

4. 研究成果

15T マグネットシステムを導入・整備を行った後、既設の核スピンの効果測定用 1.5K インサートを組み合わせた測定系により、1 重項スピンのブロック効果領域とその周辺でのソースドレイン電流・電圧特性に核スピンの偏極に起因すると思われるヒステリシスの詳細な測定および解析を行った。これらのヒステリシスを 2 電子エネルギー状態と比較することで核スピンの偏極に寄与する電子状態の同定を行った。

クーロンダイヤモンド測定による 1 重項スピンのブロック効果の観測と、励起スペクトル測定との比較を行った。磁場 5T から 8T 程度で観測される 1 重項スピンのブロック効果と励起スペクトルで観測される 1 重項・3 重項基底状態遷移はよく一致している。また 1 重項スピンのブロック効果のリーク電流は約 10pA 程度と通常の 3 重項スピンのブロック効果にくらべ大きい。これはエンタングル状態である 1 重項状態が核スピンの揺らぎの影響により比較的容易に破壊されることで説明できる。これらの結果をまとめた論文を Appl.Phys.Lett 誌に投稿し、受理された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Tarucha, K. Kono, and K. Ono, Spin blockade in a double quantum dot containing three electrons, Phys. Rev. B 89, 085302 (2014). 10.1103/PhysRevB.89.085302

K. Ono, T. Tanamoto, T. Ohguro, Pseudo-symmetric bias and correct estimation of Coulomb/confinement energy for an unintentional quantum dot in MOSFET channel, Appl. Phys. Lett. 103, 183107 (2013). 10.1063/1.4827817

S. M. Huang, A. O. Badrutdinov, K. Kono, and K. Ono, A possible solution for charge sensing in vertical double quantum dots, J. Phys. Cond. Matt. 25, vol. 34, 345301

(2013). 10.1088/0953-8984/25/34/345301

A. O. Badrutdinov, S. M. Huang, K. Ono, K. Kono, and D. A. Tayurskii, Dynamic nuclear polarization with three electrons in a vertical double quantum dot, Phys. Rev. B 88, 035303 (2013). 10.1103/PhysRevB.88.035303

S. M. Huang, A. O. Badrutdinov, K. Kono, and K. Ono, Strong Rashba Spin-Orbit Interaction Intensity in Low-Potential-Barrier Quantum dots, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CJ02 (2013). 10.7567/JJAP.52.04CJ02

Y. C. Sun, S. Amaha, S. M. Huang, J. J. Lin, K. Kono, and K. Ono, Spin blockade with spin singlet electrons, Appl. Phys. Lett. 101, 263108 (2012). 10.1063/1.4773304

R. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, and K. Ono, Electrical Detection of Nuclear Magnetic Resonance Signal of Nuclear Spins of order 10^4 in a Semiconductor Double Quantum Dot, Appl. Phys. Exp. 5, 025002 (2012). 10.1143/APEX.5.025002

[学会発表](計 13 件)

天羽真一, M. Delbecq, 中島峻, 大塚朋廣, 大野圭司, D. G. Austing, 羽田野剛司, 樽茶清悟, 縦横結合 4 重量子ドットの電気伝導特性, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学 湘南キャンパス, 平塚市, 2014 年 3 月 17-20 日.

K. Ono, T. Tanamoto, T. Ohguro, Pseudo-symmetric bias and correct estimation of Coulomb/confinement energy for an unintentional quantum dot in MOSFET channel, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), Hilton Hukuoka Sea Hawk, Hukuoka, Japan, September 24-27, 2013.

K. Ono, T. Tanamoto, T. Ohguro, ESR of single defect center in silicon MOSFET, 第 3 回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルサンバレー那須、栃木県那須郡、2013 年 9 月 4-6 日

K. Ono, T. Tanamoto, T. Ohguro, Application of Pauli spin blockade; detecting unknown spins and entanglement generation, VietNam 2013 IXth Rencontres du Vietnam, Seagull Hotel, Quy-Nhon, Vietnam. August 4-10, 2013.

天羽真一, 都倉康弘, 黒澤元, 久保敏弘,

近藤裕佑, 樽茶清悟, 河野公俊, 大野圭司, スピンプロケイドの電流閉塞状態の遷移と電流の 2 値的振る舞い, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学 東広島キャンパス, 東広島市, 2013 年 3 月 26-29 日.

大野圭司, 棚本哲史, 大黒達也, 部分窒化された酸化膜をもつシリコン MOS トランジスタにおける量子ドットの輸送現象, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学 東広島キャンパス, 東広島市, 2013 年 3 月 26-29 日.

Keiji Ono, Orbital, spin and nuclear spin manipulation in semiconductor quantum dots (invited), 2nd RIKEN-KFU WORKSHOP, Physics, Chemistry and Biology of Complex Systems – On the way to transdisciplinary research, Kazan Federal University, Russia, Nov. 19-22, 2012.

Y. C. Sun, S. M. Huang, J. J. Lin, K. Kono and K. Ono, The observation of rectangle shape geometric current blockade in vertical double quantum dots, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, September 25-27, 2012.

天羽真一, 樽茶清悟, 河野公俊, 大野圭司, 共鳴トンネル電流に対するスピン-重項電流閉塞の効果, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学常盤台キャンパス, 横浜市, 2012 年 9 月 18-21 日.

大野圭司, 天羽真一, 孫羽澄, 河野公俊, 縦型 2 重量子ドットにおける電子スピン共鳴と核スピン効果, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学常盤台キャンパス, 横浜市, 2012 年 9 月 18-21 日.

Keiji Ono, Quantitative evaluation of nuclear spin polarization in quantum dots, 第 2 回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルサンバレー那須、栃木県那須郡、2012 年 9 月 5-7 日.

Keiji Ono, “Adopt or reject” ferromagnetism in multiple quantum dot devices, International Workshop: Physics of information, information in physics, and the demon, Institute for Molecular Science, Okazaki, Japan, 27-29th June, 2012

Keiji Ono, Nuclear spin manipulation in semiconductor quantum dot devices

(invited), NPCQS2012: Nonequilibrium phenomena in complex quantum systems: from correlated electrons to mesoscopic devices, OIST, Okinawa, Japan, Apr. 23-27, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 圭司 (Ono Keiji) 独立行政法人
理化学研究所・河野低温物理研究室・専任研究員

研究者番号：00302802

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

天羽 真一 (Amaha Shinichi) 独立行政法人
理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：90587924